

ной металлической детали.

- Показано, что на исследуемый временной сдвиг  $\Delta t_m$  существенное влияние оказывает длительность фронта  $\tau_f$  и частотный спектр тока  $i_{\text{инд}}(t)$ .

**Список литературы:** 1. Батыгин Ю.В., Лавинский В.И., Чаплыгин Е.А. Особенности токов, индуцированных низкочастотным полем одновиткового соленоида в плоских листовых металлах // *Электротехника і електромеханіка*. – 2005. – № 3. – С. 69-73. 2. Батыгин Ю.В., Сериков Г.С., Бондаренко А.Ю. Индукционная индукторная система с двойным витком // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2009. – № 1. – С. 59-61. 3. Белый И.В., Фертик С.М., Хименко Л.Т. Справочник по магнитно-импульсной обработке металлов. – Харьков: Вища школа, 1977. – 168 с. 4. Аношин О.А., Белоглазский А.А., Верецагин И.П. и др. Высоковольтные электротехнологии / Под ред. И.П. Верецагина. – М.: Изд-во МЭИ, 2000. – 204 с. 5. Электрофизические и электрохимические методы обработки материалов / Под ред. В.П. Смоленцева. – М.: Высшая школа, 1983. – Т. 1. – 247 с. 6. Баранов М.И. Аналитический расчет времени электрического взрыва проводников под воздействием больших импульсных токов высоковольтных электрофизических установок // *Электротехніка і електромеханіка*. – 2004. – № 4. – С. 95-99. 7. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов. Том 1. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 536 с. 8. Кухлинг Х. Справочник по физике: Пер. с нем. – М.: Мир, 1982. – 520 с. 9. Месяц Г.А. Генерирование мощных наносекундных импульсов. – М.: Советское радио, 1974. – 256 с. 10. Нейман Л.Р., Демирчян К.С. Теоретические основы электротехники: Учебник для вузов. Том 2. – Л.: Энергоиздат, 1981. – 416 с.

*Поступила в редколлегию 07.04.2009.*

УДК 532:537.528:62-5

**Г.А.БАРБАШОВА**, канд. физ.-мат. наук, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев;

**Р.В.ТЕРТИЛОВ**, Институт импульсных процессов и технологий НАН Украины, Николаев

## **ВОССТАНОВЛЕНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК КАНАЛА РАЗРЯДА ПО ДВУХПУЛЬСАЦИОННОЙ ЗАВИСИМОСТИ ДАВЛЕНИЯ ОТ ВРЕМЕНИ В ТОЧКЕ ЖИДКОСТИ**

Запропоновано спосіб відновлювання характеристик плазмового каналу, що створюється внаслідок електровибуху мікропровідника у рідині, за відомою двохімпульсною кривою тиску у точці рідини. Цей спосіб полягає у послідовному розв'язанні обернених гідродинамічної та електродинамічної задач.

The way of restoring plasma channel formed during the process of micro conductor explosion in liquid, characteristics from the knowledge of two pulse pressure curve at some point inside liquid is offered. The method is based on the sequential solution of the corresponding hydrodynamic and electrodynamic problems.

## 1 Введение

Важнейшей задачей при разработке разрядноимпульсных технологий, использующихся в различных отраслях промышленности, есть создание такого источника энергии, который при минимальной затрате электрической энергии обеспечивал бы наиболее благоприятную гидродинамическую нагрузку на объект обработки. Традиционно сначала проектируется источник электрической энергии, а затем, меняя его параметры, подбирается наиболее приемлемый режим для обрабатываемого объекта [1].

Авторы работы [1] предложили иной подход к решению задачи проектирования технологических процессов, а именно: путем решения цепочки обратных задач восстановить электрические характеристики источника энергии по заданной временной зависимости давления в точке жидкости. Работа делится на три этапа. На первом этапе решается обратная гидродинамическая задача восстановления характеристик образующейся при взрыве плазменной полости – канала разряда (в частности, радиуса  $a(t)$ , скорости расширения  $\dot{a}(t)$  и давления  $p_a(t)$ ) по заданной зависимости давления от времени в точке жидкости. На втором этапе решается обратная электродинамическая задача: по значениям  $a(t)$ ,  $\dot{a}(t)$  и  $p_a(t)$  вычисляются  $R_a(t)$  – сопротивление канала;  $\sigma_a(t)$  – электропроводимость плазмы;  $I(t)$  – ток в канале разряда;  $U(t)$  – напряжение на канале. На третьем этапе определяются входные параметры высоковольтной электроразрядной системы, обеспечивающие заданное давление в точке жидкости.

В этой же статье приведены примеры решения обратной электродинамической задачи. Способ решения обратной гидродинамической задачи подводного электрического взрыва микропроводника описан в [2]. В этих работах задачи решены для моноимпульсного закона ввода электрической мощности в канал разряда. Но во многих разрядноимпульсных технологиях реализуется многоимпульсный ввод мощности [3], поэтому поиск подхода к решению задачи восстановления характеристик канала разряда по двухпульсационной кривой давления в жидкости, аналогичного [1], весьма актуален.

Ранее в работах [4, 5] получен ряд важных закономерностей двухпульсационных разрядов для модельных законов ввода электрической мощности. В частности, показано, что для получения второй пульсации давления в канале разряда, а, следовательно, и в жидкости, необходимо во втором импульсе ввести большее количество энергии, чем в первом. А для того, чтобы амплитуды давления были равновелики, вводимая во втором импульсе энергия должна более, чем в 3 раза, превышать энергию первого. При этом скорость нарастания второго импульса мощности должна быть больше скорости нарастания первого.

Цель настоящей работы – найти подход к решению обратных электро-

динамической и гидродинамической задач восстановления характеристик канала разряда, образующегося при взрыве микропроводника, по заданной в точке жидкости двухпульсационной зависимости давления от времени. Ранее обратная гидродинамическая задача для двухпульсационной кривой давления при малых (до 200 м/с) скоростях расширения канала разряда решена В.С.Крутиковым [6]. Но исследования выполнялись в одномерном приближении течения жидкости, что не дает возможности определить, в частности, расстояние между электродами. Поэтому задачу нужно решать, как минимум, в двумерной постановке. Да и скорости расширения канала разряда могут быть существенно выше.

## 2 Постановка и метод решения обратной гидродинамической задачи

В точке жидкости задана таблично двухпульсационная зависимость давления от времени –  $pp(t)$ . Необходимо восстановить длину микропроводника и временные зависимости радиуса канала разряда, скорости его расширения и давления в канале (гидродинамическая задача), по которым определить разрядный ток, сопротивление канала и напряжение на канале разряда (электродинамическая задача).

Полагаем, что канал разряда в начальный момент времени имеет форму прямого кругового цилиндра конечной длины, заполнен идеальной низкотемпературной плазмой и расширяется в идеальной сжимаемой жидкости. А точка жидкости, в которой задана зависимость давления от времени, находится в плоскости срединного сечения канала разряда.

Для первого импульса давления жидкости в точке решаем обратную гидродинамическую задачу методом подбора [7], то есть решаем прямую задачу о расширении цилиндрической полости в жидкости. Сравниваем получаемую в той же точке жидкости зависимость давления от времени  $p(t)$  с заданной в пространстве непрерывных ограниченных функций на отрезке  $[t_1, t_2]$  ( $t_1$  – момент времени прихода фронта волны давления в заданную точку жидкости,  $t_2$  – время окончания счета) –  $C_{[t_1, t_2]}$  [8]. Если расстояние между ними  $\rho(pp, p) = \max_{t_1 \leq t \leq t_2} |pp(t) - p(t)|$  меньше 5 % амплитуды заданной кривой

давления, то длина микропроводника и пять точек ломаной линии, моделирующей закон ввода электрической мощности, есть решение обратной гидродинамической задачи.

Математическая модель задачи о расширении цилиндра в жидкости, соответствующая принятым допущениям, включает в себя:

- систему двумерных нелинейных уравнений газовой динамики [9]:

$$\frac{\partial(rF_1)}{\partial t} + \frac{\partial(rF_2)}{\partial z} + \frac{\partial(rF_3)}{\partial r} = F_4;$$

$$F_1 = [\rho, \rho v_r, \rho v_z, e]^T; \quad F_2 = [\rho v_z, \rho v_z v_r, \rho v_z^2 + p, (e + p)v_z]^T;$$

- $$F_3 = [\rho v_r, \rho v_r^2 + p, \rho v_r v_z, (e + p)v_r]^T; F_4 = [0, p, 0, 0]^T;$$
- двучленное уравнение состояния [9]:
$$\varepsilon = [p - c_0^2(\rho - \rho_0)]/[\rho(\kappa - 1)];$$
  - уравнение баланса энергии [10] на внутренней границе расчетной области (стенка канала разряда):
$$1/(\gamma - 1)d(p_a(t) \cdot V(t))/dt + p_a(t) \cdot dV(t)/dt = N(t);$$
  - условия динамической совместности на внешней границе расчетной области [9]:

$$\begin{aligned} [\rho]D - [\rho v_n] &= 0; \\ [\rho v_n]D - [\rho v_n^2 + p] &= 0; \\ [\rho(\varepsilon + v_n^2/2)]D - [\rho v_n(\varepsilon + v_n^2/2) + p v_n] &= 0. \end{aligned}$$

Здесь  $t$  – время;  $r, z$  – цилиндрические координаты;  $v_r, v_z$  – радиальная и осевая компоненты вектора скорости жидкости;  $p$  – давление;  $\rho$  – плотность;  $e = \rho[\varepsilon + (v_r^2 + v_z^2)/2]$ ,  $\varepsilon$  – удельная внутренняя энергия;  $\kappa = 7,15$ ;  $\rho_0, c_0$  – плотность и скорость звука в покоящейся жидкости;  $\gamma = 1,26$ ;  $p_a(t)$ ,  $V(t)$  – давление в канале разряда и его объем;  $N(t)$  – вводимая в разрядный канал мощность;  $v_n$  – нормальная составляющая вектора скорости жидкости;  $D$  – скорость ударной волны;  $[f] = f_1 - f_2$ ;  $f_1, f_2$  – значения функции слева и справа от ударной волны.

Начальные значения гидродинамических параметров равны своим значениям в невозмущенной среде. Закон ввода электрической мощности в канал разряда задаем состоящей из четырех звеньев ломаной линией [2]. Задача решается конечноразностным методом Годунова [9].

Из множества полученных решений обратной гидродинамической задачи для первой пульсации давления в жидкости выбираем те закон ввода электрической мощности и длину микропровода, при которых расстояния  $\rho(pp, p)$  между первыми пульсациями задаваемой и вычисленной зависимостями давления от времени в точке жидкости меньше, чем при других решениях задачи. Полученные при решении прямой гидродинамической задачи с этими законом ввода мощности и длиной микропровода характеристики разряда (например, количество выделившейся в первый полупериод энергии, зависимость от нее амплитуды давления в канале разряда, скорость нарастания мощности) применяем для решения задачи для второй пульсации давления в жидкости. Для этого, используя также отмеченные выше результаты исследований [4, 5], моделируем закон ввода второго импульса электрической мощности ломаной линией. Варьируя ее координаты, решаем прямую задачу для двухимпульсного закона ввода мощности. Если первый импульс давления в точке жидкости совпадает с кривой давления, полученной при моноимпульсном законе ввода мощности, и амплитуда второго импульса и

время ее достижения отличаются от соответствующих характеристик заданной кривой на величину, допустимую с практической точки зрения, то смоделированный закон ввода мощности и длина микропроводника – решение обратной гидродинамической задачи восстановления характеристик канала разряда по двухпульсационной кривой давления в жидкости. Задача имеет множество решений. Выбираем из них то, при котором вычисленная кривая давления в точке жидкости имеет меньшее отличие от заданной среди всех полученных кривых давления.

### 3 Результаты решения обратной гидродинамической задачи

В качестве примера применения описанного подхода к решению обратной гидродинамической задачи подводного взрыва микропроводника рассмотрим задачу восстановления характеристик канала разряда, в частности, радиуса, скорости расширения и давления по полученной экспериментально кривой давления в точке жидкости  $r_1 = 0,1$  м [11] (рис. 1, кривая 1).

В качестве решения обратной задачи по первой пульсации давления принимаем закон ввода мощности, моделируемый линией 1 на рис. 2, а длина микропроводника  $l = 0,04$  м.

Учитывая результаты работ [4, 5], определяем закон ввода второго импульса мощности в канал разряда. Некоторые решения задачи приведены на рис. 2, а на рис. 1 – соответствующие им зависимости давления от времени в точке  $r_1 = 0,1$  м. Наименьшее отличие амплитуды второй пульсации давления от амплитуды второй пульсации заданного давления имеет зависимость 2 (рис. 1) – 2 %, полученная при законе ввода мощности, моделируемом ломаной 2 на рис. 2. Определенный при этом радиус канала разряда и давление в канале представлены на рис. 3 и 4 соответственно. Максимумы кривой давления в канале разряда разнятся на 12 %.

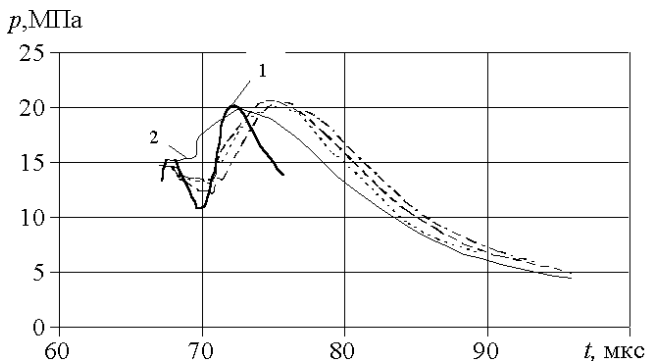


Рисунок 1 – Давление в точке жидкости  $r_1 = 0,1$  м

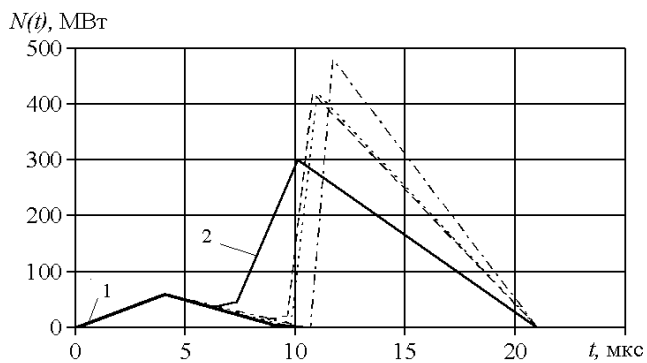


Рисунок 2 – Моделируемые законы ввода электрической мощности в канале разряда

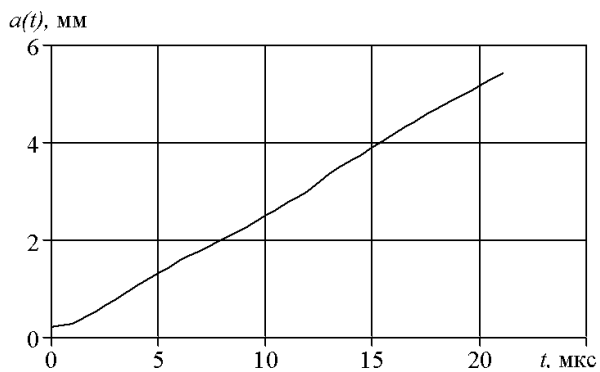


Рисунок 3 – Радиус канала разряда

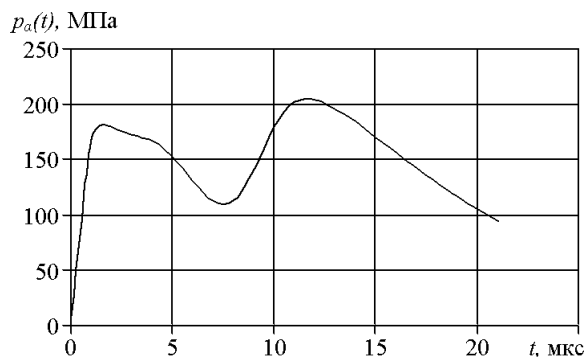


Рисунок 4 – Давление в канале разряда

#### 4 Обратная электродинамическая задача

Для решения обратной электродинамической задачи используем соотношения [1]:

$$N(t) = \frac{1}{\gamma - 1} \frac{d(p_a(t) \cdot V(t))}{dt} + p_a(t) \frac{dV(t)}{dt};$$

$$\sigma_a(t) = [A(\gamma - 1)]^{-1} p_a(t); \quad R_a(t) = l \cdot [\sigma_a(t) \cdot \pi \cdot a^2(t)]^{-1};$$

$$I(t) = \left[ \frac{N(t)}{l} \cdot \sigma_a(t) \cdot \pi \cdot a^2(t) \right]^{1/2}; \quad U(t) = I(t) \cdot R_a(t).$$

Здесь  $A$  – искровая постоянная, при взрыве микропроводника  $A = 0,25 \cdot 10^5 \text{ В}^2 \cdot \text{с}/\text{м}^2$ .

Вычисленные по этим соотношениям ток и напряжение на канале разряда приведены на рис. 5 и 6 соответственно.

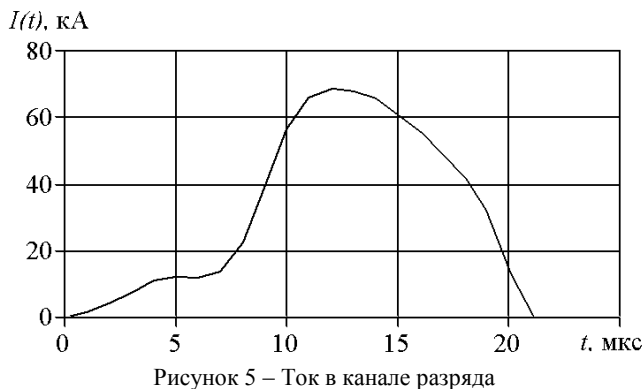


Рисунок 5 – Ток в канале разряда

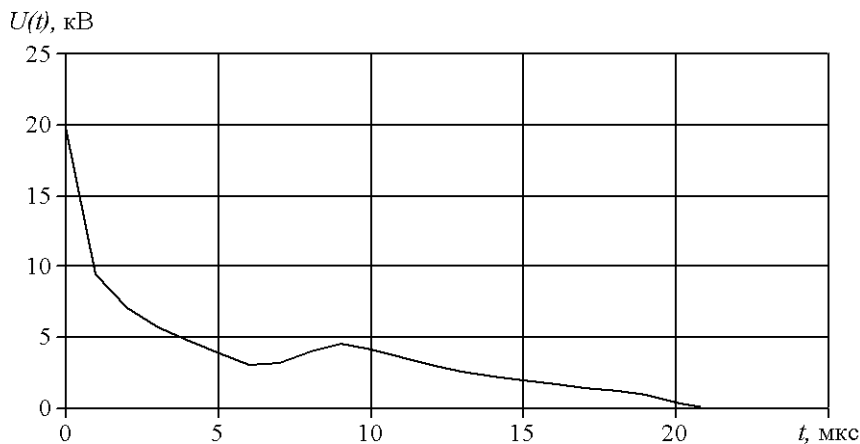


Рисунок 6 – Напряжение на канале разряда

## 5 Выводы

Моделируя закон ввода в канал разряда электрической мощности ломаной линией, можно, решая обратную гидродинамическую задачу электрического взрыва микропроводника методом подбора и используя установленные ранее закономерности [4, 5], приближенно восстановить характеристики канала разряда по заданной в точке жидкости двухпульсационной кривой зависимости давления от времени. По полученным временным зависимостям радиуса канала разряда, скорости его расширения и давления в канале может быть решена обратная электродинамическая задача.

Такой подход к решению обратной гидродинамической задачи для второй пульсации давления в жидкости можно использовать при разработке технологий, в которых эффективность воздействия гидродинамической нагрузки на обрабатываемый объект зависит больше от амплитуды волны давления, чем от ее импульса, так как вторые пульсации заданного и вычисленного давления в жидкости могут существенно отличаться по форме.

Авторы благодарят доктора технических наук, профессора А.И.Вовченко за внимание к работе и ценные замечания.

**Список литературы:** 1. *Вовченко А.И., Шомко В.В., Шишов А.М.* Математическое моделирование и оптимизация электрогидроимпульсных технологических процессов // *Технічна електродинаміка*. – 2005. – № 3. – С. 68-73. 2. *Барбашова Г.А.* О восстановлении характеристик канала подводного искрового разряда по временной зависимости давления в жидкости // *Прикладна гідромеханіка*. – 2007. – Т. 9, № 4. – С.69-72. 3. *Гулый Г.А.* Научные основы разрядноимпульсных технологий. – Киев: Наукова думка, 1990. – 208 с. 4. *Барбашова Г.А., Вовченко А.И., Каменская Л.А., Шомко В.В.* Управление гидродинамическими процессами при электровзрывном программируемом многоимпульсном вводе энергии // *Акустичний вісник*. – 2004. – Т. 7, №4. – С. 3-9. 5. *Барбашова Г.А., Вовченко А.И., Каменская Л.А., Шомко В.В.* Гидродинамические параметры электрических разрядов в жидкости при двухимпульсном вводе энергии // *Электронная обработка материалов*. – 2006. – № 2. – С. 23-29. 6. *Крутиков В.С., Лопатнев А.Г.* Особенности гидродинамических характеристик импульсных процессов в сжимаемой среде при многократном законе ввода энергии // *ПЖТФ*. – 1999. – Т. 2, вып. 14. – С. 34-41. 7. *Тихонов А.Н., Арсенин В.Я.* Методы решения некорректных задач. – М.: Наука, 1986. – 288 с. 8. *Колмогоров А.Н., Фомин С.В.* Элементы теории функций и функционального анализа. – М.: Наука, 1989. – 624 с. 9. Численное решение многомерных задач газовой динамики / Под ред. *С.К. Годунова*. – М.: Наука, 1976. – 400 с. 10. *Наугольных К.А., Рой Н.А.* Электрические разряды в воде. – М.: Наука, 1971. – 155 с. 11. *Вовченко А.И., Посохов А.А.* Управляемые электровзрывные процессы преобразования энергии в конденсированных средах. – Киев: Наукова думка, 1992. – 168 с.

*Поступила в редколлегию 20.03.2009.*